

# 基于潮流转移的输电断面快速搜索

杨文武<sup>1</sup>, 王 彪<sup>2</sup>, 王嘉庚<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 国网四川省电力公司调度控制中心, 四川 成都 610047)

**摘要:** 针对前人研究中的不足, 即没有提出分区内部输电断面以及非割集形式的基于热稳定约束的输电断面的搜索方法, 将整个省网在地理分区的基础上对交界厂站进行优化, 分别对分区间和分区内部进行研究, 仅考虑线路和主变压器的热稳定约束, 运用图论的相关知识, 根据潮流转移的特征, 进行输电断面的搜索。算例表明了所提算法的有效性。

**关键词:** 分区优化; 热稳定极限; 潮流转移; 脆弱线路; 输电断面

**Abstract:** Aiming at the deficiency of previous studies, that is, the search method for transmission section in the zone and transmission section of non-cut set form, so the border stations are optimized on the basis of geographical divisions. The thermal stability constraints of lines and main transformer are only considered and the graph theory is used to search transmission section according the features of power flow transfer. Examples show the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** partition optimization; thermal stable limit; power flow transfer; fragile lines; transmission section

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)02-0056-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.02.013

## 0 引言

电力系统越来越复杂, 在运行过程中, 为了保证电网的安全稳定运行, 需要有一系列的运行规则, 而这个运行规则一般是在输电断面的基础上制定的。在电网实际运行中, 传统的输电断面搜索是根据电网运行人员的经验或者经过全网计算分析所得, 但由于人工计算的极限以及越来越多的新能源注入电网, 传统的人工发现电网输电断面的方法已经无法满足大规模电力系统的需要, 因此, 越来越多的学者关注到输电断面的自动搜索。

目前, 有关输电断面的自动搜索方法主要有:

1) 通过电网的网络拓扑和电气联系的紧密程度, 将大规模复杂的网络划分为多个联系薄弱的子区间<sup>[1-7]</sup>, 而输电断面就是这些子区间之间的联络线间的组合。该方法虽然能够是复杂的网络得到极大的简化, 但是无法对分区内的线路进行搜索, 即会漏掉分区内部的输电断面。2) 基于大电网安全的角度, 根据过载支路两端节点之间的最短路径<sup>[8-12]</sup>来找到受过载支路影响严重的线路组成输电断面。该方法搜索得到的线路是一些串联的线路, 只适用于

大电网安全的紧急控制, 无法用于输电断面输电能力的计算以及状态的监控。3) 根据过载线路的电气特征, 找到与过载线路功率组成相似<sup>[13]</sup>的线路作为输电断面。该方法基于交流潮流, 计算量大。

针对前人研究中的不足, 即没有提出分区内部输电断面的搜索方法以及非割集的基于热稳定约束的输电断面的搜索方法, 下面将整个省网在地理分区的基础上对交界厂站进行优化, 分别对分区之间和分区内部进行研究, 仅考虑线路和主变压器的热稳定约束, 运用图论<sup>[14]</sup>的相关知识, 根据潮流转移的特征, 进行输电断面的搜索。

## 1 电力系统分区

### 1.1 电网参数预处理

由于实际电网规模庞大, 难以有效分析, 需要根据其特征进行简化。可以将厂站中所有母线合并为一条母线, 因此所研究的对象就是发电厂、变电站和线路, 具体原则为:

- 1) 只考虑高压输电网(220 kV及以上), 不考虑配电网和发电厂、变电站的主接线;
- 2) 合并并联的输电线路(消除多重线路)。

### 1.2 交界节点分区优化

交界节点是指以地理分区为基础,连接2个及多个区域的低电压等级(220 kV)节点。分区间一般以高电压等级(500 kV)节点相连,为了保证分区间联络线的功率方向保持一致,对边界节点之间相关联的线路进行修正。当线路的潮流方向与该区域高电压等级(500 kV)联络线的潮流方向相反,若该线路的有功潮流与高电压等级联络线的有功潮流绝对值之比小于阈值 $k$ ,则认为潮流方向相同(例如内江市的董家湾节点和自贡市的向义节点之间的线路);若该线路的有功潮流与高电压等级联络线的有功潮流绝对值之比大于阈值 $k$ ,则需要对交界节点 $i$ 和 $j$ 进行调整,调整方法如下:

- 1) 比较交界节点 $i$ 和 $j$ 的度,将较小度的节点归入较大度的节点所在的区域。
- 2) 检验调整后的联络线的潮流方向是否一致,若不一致,转到步骤1);若一致,则结束调整。

### 1.3 电力网络的图论模型

简化后的电力系统中包括发电厂、变电站和输电线路。如果只考虑电力网络的拓扑结构,可以将电力网络用图 $G=(V,E)$ 来表示,其中: $V=(v_1, v_2, \dots, v_n)$ 是指图的顶点集合,表示实际电力系统中的发电厂和变电站; $E=(e_1, e_2, \dots, e_k)$ 是指图的边集合,表示实际电力系统中的输电线路。

在输电系统中,线路的电阻相对于电抗来说可以忽略不计,因此用线路电抗 $x$ 来表示线路权值 $w$ ,其加权邻接矩阵表示如下:

$$a_{ij} = \begin{cases} w_{ij} & i \neq j, i, v_i, v_j \in E \\ 0 & i = j \\ \infty & i \neq j, i, v_i, v_j \notin E \end{cases} \quad (1)$$

式中: $w_{ij}$ 为边的权值,这里以线路电抗值来表示;0为对角元素值; $\infty$ 表示两个顶点 $v_i, v_j$ 之间没有直接相连的线路。

## 2 输电断面的搜索

输电断面的特征如下:

- 1) 输电断面中的线路之间的联系紧密,相互之间的支路开断分布因子比较大;
- 2) 输电断面中有1条线路开断时,其他线路的安全裕度比较小;
- 3) 输电断面中的线路有功功率的方向相同。

### 2.1 区域间输电断面的搜索

对于实际运行的电网来说,由区域间联络线所构成的输电断面应该是系统的割集。根据输电断面的定义,只要分区得当,即可以满足输电断面的第3个特征。输电断面的搜索其实就是简化后电网割集的求取过程,只涉及电网的拓扑关系,因此可以通过简单的矩阵运算得到。图1是经过简化后某系统的分区图,下面通过图1来说明区域间输电断面的搜索过程。

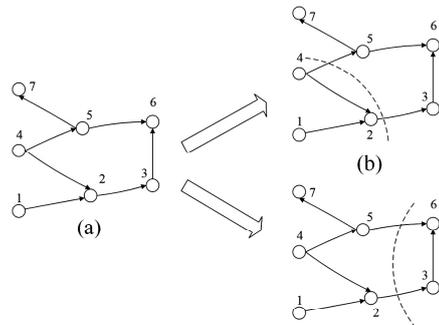


图1 输电断面搜索示意图

步骤1: 将简化后系统分区图中的联络线全部存放在集合 $L$ 中, $L = \{L_{1-2}, L_{2-3}, L_{3-6}, L_{4-2}, L_{4-5}, L_{5-6}, L_{5-7}\}$ 。

步骤2: 将集合 $L$ 中的线路按顺序逐条进行开断,判断系统是否连通。若不连通,则将该线路作为输电断面,且将该线路从集合 $L$ 中删除;若连通,则转向步骤3。

步骤3: 通过简单的矩阵运算求取与开断线路相关的输电断面,然后将该开断线路从集合 $L$ 中删除。判断集合 $L$ 中是否有线路,若有,转向步骤2;若没有,结束,区间输电断面搜索完成。

步骤3中的区域间输电断面的搜寻分为送电断面和受电断面两部分来完成,下面以 $L_{2-3}$ 为例,来说明求取输电断面的具体方法。

步骤①: 求取系统分区图的邻接矩阵 $A$ 。

步骤②: 由邻接矩阵 $A$ 求取系统分区图路径矩阵 $P$ 。其算法是,假设矩阵为 $n$ 阶,求出 $B_n = A + A^2 + \dots + A^n$ ,然后把矩阵 $B_n$ 中不为0的元素改为1,而为0的元素不变,这样改变后的矩阵就是路径矩阵 $P$ 。

步骤③: 由路径矩阵 $P$ 加上 $n$ 阶单位矩阵得到矩阵 $Q$ 。

步骤④: 令 $Q_2 = Q(:, 2)$ ,即 $Q$ 的第2列;令 $Q'_2 = (Q_2^{-1})^T$ ,即将 $Q_2$ 中元素为0的换为1,将 $Q_2$ 中

元素为1的换为0,且将 $Q_2$ 转置,变为行向量。

步骤⑤:令 $Q_3 = Q(3, :)$ ,即 $Q$ 的第3行;令 $Q'_3 = (Q_3^{-1})^T$ ,即将 $Q_3$ 中元素为0的换为1,将 $Q_3$ 中元素为1的换为0,且将 $Q_3$ 转置,变为列向量。

步骤⑥:送电断面 $T = (Q_2^* Q'_2) \otimes A$ ,即将 $Q_2$ 和 $Q'_2$ 相乘以后和邻接矩阵 $A$ 相与。

步骤⑦:受电断面 $R = (Q'_3^* Q_3) \otimes A$ ,即将 $Q'_3$ 和 $Q_3$ 相乘以后和邻接矩阵 $A$ 相与。

输电断面的最终搜索结果如表1和表2所示。

表1 送电断面搜索结果

送电断面	1	2	3	4	5	6
	$l_{1-2}$	$l_{2-3}$	$l_{3-6}$	$l_{4-5}$	$l_{5-6}$	$l_{5-7}$
包含线路		$l_{4-5}$	$l_{4-5}$	$l_{4-2}$	$l_{5-7}$	$l_{4-2}$

表2 受电断面搜索结果

受电断面	1	2	3	4	5
	$l_{1-2}$	$l_{2-3}$	$l_{3-6}$	$l_{4-5}$	$l_{5-7}$
包含线路	$l_{4-2}$	$l_{5-6}$	$l_{5-6}$	$l_{3-6}$	
	$l_{5-6}$				

将表1和表2中的送电断面、受电断面集合起来形成输电断面,剔除输电断面中重复的断面,则输电断面的个数将从11个减为9个;另外,送电断面中断面5将网络分为3个不连通的部分,这与实际中控制的输电断面不符,故将其删除,则输电断面的总个数变为8个。至此,区域间的输电断面的搜索结束。

## 2.2 区域内部输电断面的搜索

对实际运行的电网来说,区域内部即各地市输电的网架结构基本上以220 kV为主,而现有文献对区域内部输电断面的搜索很少,因此这里对区域内部220 kV的输电断面的搜索进行了研究。

根据对各地市220 kV等级的输电断面的特征进行研究,发现区域内部的输电断面不同于区域间的输电断面。区域间的输电断面是电网的一个割集,而对于区域内部的输电断面来说,输电断面是电网中一个割集中的全部线路或若干条线路,此类输电断面在电网运行中广泛出现,尤其是负荷较重的时候,受到了运行人员越来越多的关注。

电力系统运行时,定义电网中的关键线路是指在电能传输过程中起到关键作用的线路。当关键线路发生故障时,潮流发生大规模的转移,有可能引起

连锁故障,对电网的损害非常大;而负载重的线路相对来说更容易发生故障,因此将负载重的线路和关键线路称为电网中的脆弱线路,需要对其进行识别和监控,找到相关的输电断面,方便运行人员的实时监控。

### 2.2.1 脆弱线路的识别

当电网中节点对 $s, t$ 间(不必有支路直接相连)的传输功率变化了 $\Delta P_{st}$ 时,即节点 $s, t$ 的有功注入功率分别变化 $+\Delta P_{st}$ 和 $-\Delta P_{st}$ ,其他节点有功注入功率不变,线路 $l_{i-j}$ 潮流变化 $\Delta P_{ij}$ 为

$$\begin{cases} \Delta P_{ij} = |T_{st}(l)| \Delta P_{st} \\ T_{st}(l) = \frac{X_{is} - X_{it} - X_{js} + X_{jt}}{x_{ij}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $T_{st}(l)$ 为功率传输转移分布因子,表示发电机节点 $s$ 点和负荷节点 $t$ 发生单位有功功率的变化在线路 $l_{i-j}$ 引起的有功功率变化量; $X_{is}$ 为电力网络中节点电抗矩阵第 $i$ 行、第 $s$ 列的元素; $X_{it}$ 、 $X_{js}$ 、 $X_{jt}$ 分别为表示网络节点电抗矩阵中对应行和列的元素; $x_{ij}$ 表示线路 $l_{i-j}$ 的电抗值。

功率传输转移分布因子 $T_{st}(l)$ 只和电网的拓扑结构有关系,因此方便计算; $T_{st}(l)$ 越大,表明线路被节点对 $s, t$ 利用的越充分。

#### 1) 关键线路的识别

关键线路的识别经历了由无向图到有向图、由无权图到有权图的转变,最初采用边介数的概念来识别电力系统中的关键线路。

边介数:网络中所有发电机节点和负荷节点之间的最短路径经过该边的次数与网络中所有发电机节点和负荷节点之间总的最短路径数之比。

用边介数来识别网络中的关键线路具有一定的局限性,因为根据基尔霍夫定律,电流不止沿着最短路径来传输,而是沿着所有可能的路径流通。文献[15-17]分别采用电气介数、功率介数等来识别电网的关键线路。这里针对电网自身的传输特点,用关键介数 $B_{ij}(l)$ 的大小来表征线路在电能传输过程中所起作用的大小, $B_{ij}(l)$ 的定义式为

$$B_{ij}(l) = \sum_{i \in G, j \in D} C_{st} |T_{st}(l)| \quad (3)$$

$$C_{st} = \min_{l \in L} \frac{p(l)}{|T_{st}(l)|} \quad (4)$$

式中: $C_{st}$ 表示电网当前运行方式下发电机节点 $s$ 和负荷节点 $t$ 之间的功率传输量; $p(l)$ 表示当前运行方式下线路 $l$ 的有功功率; $G$ 表示网络中所有发电

机节点;  $D$  表示网络中所有负荷节点;  $L$  表示网络中所有输电线路。

### 2) 重负载线路的识别

对于区域内部的电网来说,最容易引起事故的就是正常运行时系统中负荷比较重的线路。当线路的传输功率长期接近甚至高于线路热稳定限额时,线路保护就会动作或者线路容易因为弧垂增大而接触树枝等引起线路短路,该线路的潮流会迅速转移到其他线路,这时候就容易引起其他线路的过载而发生连锁故障。

重负载线路:线路的安全裕度小于某个门槛值的线路。

线路  $l_{i-j}$  的安全裕度  $M(l)$  的定义为

$$M(l) = 1 - \frac{P_l}{P_{l,max}} \quad (5)$$

式中:  $P_l$  为电网当前运行方式下线路的有功功率;  $P_{l,max}$  为线路  $l_{i-j}$  的热稳定限额。

### 3) 指标归一化

将关键介数  $B_{ij}(l)$  和线路安全裕度  $M(l)$  按照下式进行归一化得到  $B_{ij}^*(l)$  和  $M^*(l)$ ,从而得到脆弱度指标  $V^*(l)$ ,求取脆弱线路。

$$K^*(l) = \frac{K(l) - K_{min}}{K_{max} - K_{min}} \quad (6)$$

式中:  $K(l)$  为原始数据;  $K_{max}$  为该组数据中的最大值;  $K_{min}$  为该组数据中的最小值。

脆弱度指标  $V^*(l)$  的计算公式为

$$V^*(l) = 0.5B_{ij}^*(l) - 0.5M^*(l) \quad (7)$$

式中: 0.5 表示关键介数  $B_{ij}^*(l)$  的权值; -0.5 表示线路安全裕度  $M^*(l)$  的权值。

脆弱度指标  $V^*(l)$  越大,说明线路越脆弱,需要重点监控。将电网中所有线路的脆弱度指标进行从大到小排序,对脆弱线路的选择可以根据当时的电网运行情况自行进行确定。由于计算速度的限制以及实际电网运行的经验,不可能对区域内所有线路进行开断试验,因此选取脆弱度指标排序中前30%的线路为脆弱线路进行研究。

## 2.2.2 基于潮流转移的输电断面搜索

### 1) 支路开断分布因子

电网中支路有功潮流的变化可能是由于1条支路或几条支路开断引起的,设基态情况下支路  $l_{k-m}$  的有功功率为  $P_l$ ,支路  $l_{k-m}$  开断会引起支路  $l_{i-j}$  上的潮流发生变化,变化量为  $\Delta P_{ij}^{km}$ ,两者之间的关系用

$D_{ij-km}$  表示。

$$\begin{cases} \Delta P_{ij}^{km} = D_{ij-km} P_l \\ D_{ij-km} = \frac{x_{km}(X_{ik} - X_{im} - X_{jk} + X_{jm})}{x_{ij}(x_{km} - X_{kk} - X_{mm} + 2X_{km})} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $D_{ij-km}$  为当支路  $l_{k-m}$  在基态情况下流过单位电流时,在该支路开断后,会在其他支路中引起的电流增量;  $x_{km}$ 、 $x_{ij}$  分别为线路  $l_{k-m}$ 、 $l_{i-j}$  的电抗;  $X_{ik}$ 、 $X_{im}$ 、 $X_{jk}$ 、 $X_{jm}$ 、 $X_{km}$ 、 $X_{kk}$ 、 $X_{mm}$  分别为节点电抗矩阵中的相对行和列的元素。

### 2) 电网潮流转移特征

当电网中某条线路  $l_{i-j}$  断开时,由于开断瞬间发电机和电动机的转速不会发生突变,因此假设电网中所有节点的注入功率不变,可以认为开断线路  $l_{i-j}$  两端节点  $i$ 、 $j$  传输的功率不变,只是原来的传输路径发生变化。而新的潮流传输途径则可以看作由开断线路的  $i$  功率送端节点到功率受端节点  $j$  的其他路径。由电路的基本原理可知,当线路两端的电压不变时,线路中的电流大小与线路的阻抗成反比,因此可以将寻找新的潮流传输途径转变为寻找以开断线路送端节点  $i$  为起点、功率受端节点  $j$  为终点的总电抗值比较小的路径。

在潮流转移路径的选择中,不仅仅要选择出从功率送端节点到功率受端节点的最短路径,而且还要选出倒数第2条最短路径、倒数第3条最短路径等等。如图2所示的8节点系统,假设各条线路的电抗值为:  $X_{5-4} = X_{6-5} = X_{1-6} = X_{1-8} = X_{8-4} = 0.03$ ;  $X_{1-2} = X_{2-3} = X_{4-3} = 0.1$ ;  $X_{2-7} = X_{3-7} = 0.125$ 。当线路  $l_{2-3}$  因故障断开后,如图2(a)所示,可以看作是线路开断前的网络(图2(b)) 和等值网络(图2(c)) 的叠加。图2(c)中,电流源  $I_s$  的大小为开断前网络中线路  $l_{2-3}$  流过的电流大小,电流沿着3条路径发生转移,如表3所示。

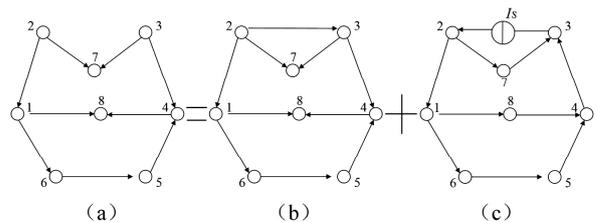


图2 8节点系统

### 3) 潮流转移路径的选取

由上面的潮流转移特征可知,开断线路一般只会影响其周围的线路。考虑线路的潮流以及热稳定

极限功率 根据实际运行经验,选取支路开断分布因子  $D_{ij-km} \geq 0.2$  的线路作为开断线路联系紧密的相关线路。

表3 8节点系统潮流转移路径分析

路径节点号	路径长度	线路电流
2-7-3	0.25	$I_{2-7} = I_{7-3} = 0.4856 I_s$
2-1-8-4-3	0.26	$I_{2-1} = I_{4-3} = 0.5144 I_s$ $I_{1-8} = I_{8-4} = 0.3086 I_s$
2-1-6-5-4-3	0.29	$I_{2-1} = I_{4-3} = 0.5144 I_s$ $I_{1-6} = I_{6-5} = I_{5-4} = 0.2058 I_s$

假设开断线路  $l_{k-m}$  起点  $k$  和终点  $m$  之间的每条路径的总电抗值都相等,而且每条路径中都没有与其他路径重复的线路。若开断线路  $l_{k-m}$  起点  $k$  和终点  $m$  之间共有 5 条路径,则依据基尔霍夫电流定律,每条路径上的线路的开断分布因子  $D_{ij-km} = 0.2$ ,即流过的电流为开断线路上原有电流的 1/5。但实际电路中不可能 2 个节点之间的所有路径的总电抗值都相等,而是电抗值应该随着路径条数的增加而增加,因此第 5 条最短路径中的线路开断分布因子  $D_{ij-km}$  应该小于 0.2;而且 2 个节点间可能有不小于 5 条路径,每增加 1 条路径,由于线路的分流作用,第 5 条路径中各条线路的开断分布因子  $D_{ij-km}$  将小于 0.2。为了不遗漏支路开断分布因子  $D_{ij-km} \geq 0.2$  的线路,这里采用搜索前  $K$  条最短路径的方法,其中  $K$  的取值由上面所述为:  $K = (1/D_{ij-km}) - 1$ 。

#### 4) 路径中控制线路的选取

搜索得到的前  $K$  条最短路径中的线路是受开断线路潮流转移影响较大的线路,但是在实际的调度运行过程中,输电断面一般是以电网中割集的形式或者是电网割集中的某几条线路的形式组成,这样才能够在输电断面的基础上制定一系列的运行规则,比如说输电断面的输电能力等。而通过前  $K$  条最短路径搜索的方法,搜索到的是些串联的线路,没有办法在这些线路上制定运行规则来保证系统的安全稳定运行,因此需要对搜索到的线路进一步地筛选。

每条路径上的线路输送电力的能力实际上取决于线路安全裕度最小的那条线路,即要选取安全裕度最小的线路作为该线路所在路径的控制线路,与开断线路共同构成输电断面。若某条路径中选出来的安全裕度最小的线路也正好在其他路径中,则将

该线路作为这两条路径的控制线路。如图 2(c) 所示,假设经过计算,第 1 条最短路径中安全裕度最小的线路为  $l_{2-7}$ ;第 2 条最短路径中安全裕度最小的线路为  $l_{2-1}$ ;第 3 条最短路径中安全裕度最小的线路为  $l_{1-6}$ ;此时线路  $l_{2-1}$  和线路  $l_{1-6}$  为第 3 条路径中的串联线路,线路  $l_{2-1}$  的开断分布因子  $D_{ij-km}$  大于线路  $l_{1-6}$  的开断分布因子,且线路  $l_{2-1}$  同时也在第 2 条和第 3 条最短路径上,因此选择线路  $l_{2-1}$  为第 2 条和第 3 条最短路径中的控制线路  $l_{2-3}$ ,最终选出与线路相关的输电断面为  $\{l_{2-3}, l_{2-1}, l_{2-7}\}$ 。

### 3 算例分析

为验证所提方法的有效性,以某省实际电网某高峰负荷期为研究对象,分别进行区域间和区域内输电断面的搜索。对电网进行简化处理后,该省网分为 21 个分区,如图 3 所示。

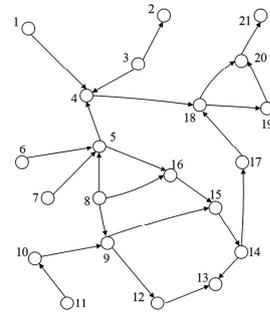


图3 某省电网地理分区图

运用所提方法,求得该省区域间的输电断面个数为 31 个,包含了运行调度人员给出的输电断面,说明此方法的准确性。在不同的运行方式下,调度运行人员只需要分析该 31 个输电断面,确定需要监控的输电断面即可,大大减小了计算量。

分区 5 为该省的省会城市,输电线路比较复杂,电网部分接线图如图 4 所示。下面以分区 5 为例对区域内的输电断面进行搜索。

表 4 列出了通过所提方法搜索到的部分输电断面。仿真表明,所得到的区域内部输电断面几乎覆盖了绝大多数实际运行中调度专家所重点监控的输电断面,该结论与广泛大范围停电事故的特征及分析结果是一致的。所提方法搜索结果遗漏了一些实际中监控的输电断面,经过验证,在上述的运行方式数据下,这些断面中的线路安全裕度比较大,不需要

监控。另外,还搜索到一些运行专家没有给出的输电断面,值得运行调度人员注意。

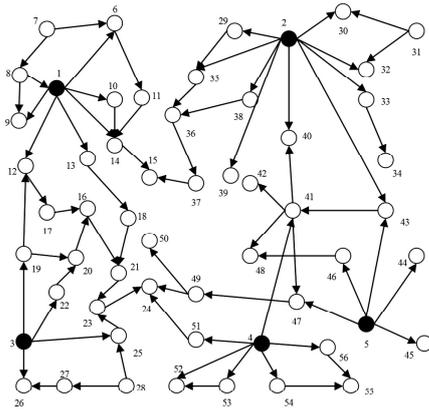


图4 某分区电网系统图

表4 输电断面搜索结果

输电断面序号	输电断面组成
1	$l_{2-35}、l_{2-38}、l_{29-35}$
2	$l_{16-21}、l_{18-21}$
3	$l_{31-30}、l_{31-32}$
4	$l_{21-23}、l_{25-23}$
5	$l_{41-42}$
6	$l_{1-10}、l_{1-14}、l_{6-11}$
7	$l_{7-6}、l_{7-8}$
8	$l_{12-17}、l_{19-20}$
9	$l_{5-43}、l_{5-47}$

## 4 结 论

通过对潮流转移特征以及实际运行中电网调度人员对输电断面的需求进行分析,在地理分区的基础上对交界厂站优化后进行分区,提出分别以区域间和区域内进行输电断面的搜索;综合考虑线路实际潮流以及线路热稳定极限的影响,最终找到适合调度人员监控的输电断面。所提方法不仅可以在离线状态下求出复杂网络的输电断面,大大减少人工计算的时间,而且可以在大电网发生故障时,将系统安全分析的范围缩小到输电断面相关的线路,有利于连锁故障的预防。

### 参考文献

[1] 周德才,张保会,姚峰.基于图论的输电断面快速搜索[J].中国电机工程学报,2006,26(12):32-38.

[2] 赵峰,孙宏斌,张伯明.基于电气分区的输电断面及其自动发现[J].电力系统自动化,2011,35(5):42-46.

[3] 雷成,刘俊勇,刘友波,等.基于状态分区的输电断面快速搜索[J].华东电力,2013,41(3):558-561.

[4] 任建文,魏俊姣.基于GN分区的输电断面快速搜索[J].现代电力,2015,32(3):42-48.

[5] 侯俊贤,韩民晓,董毅峰,等.基于子网络收缩的输电断面搜索方法[J].电力系统保护与控制,2015,43(12):92-97.

[6] 罗钢,陈金富,石东源,等.基于复杂网络理论的关键输电断面分析[J].中国电机工程学报,2013,33(25):147-155.

[7] 王涛,李渝,顾雪平,等.考虑地理分区边界优化的电网关键输电断面辨识[J].电工技术学报,2014,29(4):220-228.

[8] 苗世洪,马帅,尚亚男,等.基于割点和路径搜索的输电断面快速识别方法[J].电力系统自动化,2014,38(2):39-45.

[9] 王增平,李刚,任建文,等.基于前K最短路径的输电断面搜索新方法[J].电工技术学报,2012,27(4):193-201.

[10] 任建文,李刚,王增平,等.基于背离路径的输电断面搜索新算法[J].电网技术,2012,36(4):121-127.

[11] 张富超,钟成元,张富春,等.基于源流路径剖分的输电断面快速搜索[J].电路系统保护与控制,2015,43(12):8-13.

[12] 杨文辉,毕天姝,薛安成,等.基于图论的潮流转移路径的快速搜索[J].电网技术,2012,36(4):84-88.

[13] 程临燕,张保会,郝治国,等.基于线路功率组成的关键断面快速搜索[J].电工技术学报,2010,30(10):50-56.

[14] 卢开澄.图论及其应用[M].北京:清华大学出版社,1995.

[15] 曹一家,陈晓刚,孙可.基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J].电力自动化设备,2006,26(12):1-5.

[16] 梁才,刘文颖,但扬清,等.输电线路的潮流介数及其在关键线路识别中的应用[J].电力系统自动化,2014,38(8):35-40.

[17] 王涛,高成彬,顾雪平,等.基于功率介数的电网关键环节辨识[J].电网技术,2014,38(7):1907-1913.

作者简介:

杨文武(1992),硕士,主要从事电力系统运行与控制。

(收稿日期:2016-11-10)